

능동 신호 처리 이용한 기어의 이상 진단

* 이 상권*

Fault Diagnosis in Gear Using Adaptive Signal Processing

Lee Sang-Kwon

ABSTRACT

Impulsive sound and vibration signals in gear are often associated with their faults. Thus these impulsive sound and vibration signals can be used as indicators in the diagnosis of gear fault. The early detection of impulsive signal due to gear fault prevents from complete failure in gear. However it is often difficult to make objective measurement of impulsive signals because of background noise signals. In order to ease the detection of impulsive signals embedded in background noise, we enhance the impulsive signals using adaptive signal processing.

1. 서 론

기어로 부터의 진동 신호들은 오랜 기간동안 기어의 이상 진단에 사용 되어져 왔다.⁽¹⁾

이들 결함들은 충격에 의한 충격파들로써 나타난다. 하지만 이들 충격파를 탐지하는 것은 매우 종종 어렵다. 왜냐하면 이들은 회전속도의 하모닉들 (harmonics)과 광대역의 불규칙 신호(broadband random signal)로 구성되어 질 수 있는 배경 노이즈 (background noise)에 포함 되어져 있기 때문이다. 이러한 배경 노이즈들은 기어의 초기 이상 진단을 방해한다. 따라서 먼저 이러한 배경 노이즈를 제거 시킴으로써 충격파들을 확장 시키는 것은 기어 이상 진단에 도움이 된다.

이러한 선 처리는 여러 신호처리 범례 중 하나에 기초를 두고 있다. 성공적인 선 처리 후 신호의 신호 대 잡음비(SNR)는 증가된다. 이것은 신호의 특성을 기술하는데 사용되어 질 수 있는 여러 종류의 신호 처리 도구들의 하나에 더 잘 부합되게 만든다. 이런 신호 처리 도구들에는 Auto-Regressive(AR) 모델링⁽²⁾, Kurtosis 평가⁽³⁾, Cepstrum 분석⁽⁴⁾, 시간-주파수 분석⁽⁵⁻⁷⁾, 고차 Spectra⁽⁸⁾, 고차 시간-주파수 분

석⁽⁹⁾ 등이 있다. 게다가 기어 박스에서의 결함의 특성, 형태 인식 등은 시간-주파수 분석 및 신경망회로⁽¹⁰⁾를 사용하는 그 이상의 분석으로써 구분되어 질 수 있다. 기어에서 축 회전 속도의 기본 주파수 (fundamental frequency)와 하모닉들을 제거하기 위하여 선 처리로써 시간 평균화 방법 (time averaging method)⁽¹¹⁾들이 제안 되어져 왔다. 이러한 접근은 회전 당 한번의 비율로 야기 되어지는 신호를 필요로 하는 불리한 점이 있다. 본 논문에서는 두-단계 ALE (two-stage adaptive line enhancement)⁽¹²⁾ 가 배경 노이즈에 포함되어져 있는 충격파의 확장을 위해 적용 되어졌다. 이 방법은 기준 신호(reference signal)를 요구하지 않기 때문에 간단히 적용 될 수 있다. 첫번째 단계의 ALE는 회전속도의 하모닉들을 제거하는 역할을 하고, 두 번째 단계에서 충격파는 광역대의 불규칙 성분에 의해 확대 되어 진다. 하지만 충격파의 확장을 위한 두-단계 ALE의 성공적 응용은 능동적 필터(adaptive filter)의 변수들의 적절한 선택에 달려 있다. 예를 들면 필터의 길이, 스텝 크기(step size), 역상관 지연(decorrelation delay) 등이 있다. 본 논문에서는 수정된 LMS 알고

* 인하 대학교 기계공학과

리즘이 첫 단계에서 사용되어 졌고, QR-LSL(QR decomposition based on the Least Squared Lattice) 알고리즘이 두 번째 단계에서 사용 되어 졌다. 여러 조건들은 변수의 선택에 대해 나타난 진다. 논의된 문제에 대해 능동적 기구(adaptive scheme)는 실제 결함을 가진 공업용 기어들로 부터 측정된 데이터에 응용하였다.

2. 기어 진동 신호

공업용 기어의 진동신호는 기하학(geometry), 응력 하중(stress load), 오일, 기어 박스의 공진, 덜걱 임 등과 같은 여러 요소들에 의해 영향을 받는다. 대부분의 경우 큰 비중의 원인은 제조 과정중의 치합 전달 오차(transmission error)에 의한 진동이다. 이는 기하학적 부정확성 때문이다. 제조 과정 오차들을 전적으로 피할 수는 없다. 그래서 이것으로부터의 소음과 진동은 항상 존재한다. 일정한 속도와 하중 하에 맞물리는 기어를 고려하고, 초기에 기어의 모든 치가 동일 하고 균등하게 분포 되어 있고 가정하자. 기어들 중의 하나의 맞물림 진동 $x(t)$ 는 기본 치 맞물림 주파수 f_M 과 그들의 하모닉들로 표현 되어 질 수 있다.

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n \cos(2\pi n f_M t + \phi_n) \quad (1)$$

여기서 X_n 은 n 번째 하모닉 성분의 크기 (magnitude)이고, f_M 은 기본 치 맞물림 주파수 (fundamental tooth meshing frequency)이다.

만약 기어가 제조과정의 오차가 있어서 치형이 균일하지 않다면 피치 맞물림 진동 $x(t)$ 는 크기 (magnitude) 및 위상(phase)의 모듈레이션 (modulation)을 포함하고 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$x(t) = \sum_{n=0}^N X_n (1 + a_n(t)) \cos(2\pi n f_M t + \phi_n + b_n(t))$$

(2)

여기서 $a_n(t)$ 과 $b_n(t)$ 은 각각 크기 및 위상 모듈레이션 함수들⁽¹³⁾이다. 그것들은 다시 쓰면

$$a_n(t) = \sum_{m=0}^M A_{n,m} \cos(2\pi m f_R t + \phi_{n,m}) \quad (3)$$

$$b_n(t) = \sum_{m=0}^M B_{n,m} \cos(2\pi m f_R t + \theta_{n,m}) \quad (4)$$

여기서 f_R 은 축 회전 속도이다. 이러한 모듈레이션 함수들은 어떤 맞물림 하모닉 으로부터 다음 하모닉 까지 변할 수 있다. 그래서 첨자 n 은 식 (3)과 (4)에서 함께 작용 되어야 한다. 지금까지의 유도는 정상상태 (normal condition)의 기어에서 크기 및 위상 모듈레이션이 작을 경우에 집중되어져 왔다. 하지만 기어에 피로 균열(fatigue crack) 같은 지협적 결함(local defect)이 있을 때 모듈레이션은 넓은 주파수대로 확장되고 시간 영역에서 충격파를 형성한다. 모듈레이션들은 주파수 영역에서 기어 맞물림 주파수의 하모닉 성분의 사이드 밴드 (sideband) 주파수들이다. 이 경우에 정확한 수학적 표현은 어렵다. 하지만 진동 신호는 정규적 신호(regular signal) $x_h(t)$ (carrier 주파수)와 잔여 신호 (residual signal) $x_r(t)$ (사이드밴드 주파수)로 나누어 질 수 있다. 맞물림 주파수의 하모닉인 정규적 신호는 순수 사인파들의 합으로 구성되고, 크기 및 위상 모듈레이션 신호인 잔여 신호는 피로 균열에 의한 충격파이다. 그래서 기어의 맞물림 진동 $s(t)$ 는 다음과 같이 표현되어 질 수 있다.

$$s(t) = x_h(t) + x_r(t) + n(t) \quad (5)$$

여기서 $n(t)$ 은 광대역 노이즈이다. 기어의 초기 결함의 상태에서 축의 회전 속도의 기본 및 하모닉들의 성분, 크기 모듈레이션 되어진 신호, 기하학적 오차에 의한 위상 모듈레이션 되어진 신호 등과 같은 배경 노이즈에 포함되어져 있는 충격파를 탐지하는 것은 어려울 수 있다. 우리의 목적은 충격파

를 탐지하기 위해 배경 노이즈를 추출하고 충격파를 확장하는 것이다.

3. 이 단계 신호 향상기 (Two-Stage Adaptive Line Enhancer)

3.1 기구(scheme)의 원리

충격파를 확장하기 위해 우리는 이 단계 ALE(Adaptive Line Enhancer)를 사용한다. 그것의 블록 다이어그램은 Fig.1에서 보여주고 있다. 첫번째 단계의 ALE에서 필터의 충격신호 y_{k1} 은 입력신호 x_k 와 그것의 지연된 버전(delayed version) $y_{k-\Delta_1}$ 은 상관 관계의 신호(correlated signal)이다. 그래서 Δ_1 은 충격파가 그들의 지연된 버전들과 역상관(decorrelation)되어지도록 선택되어져야 하며, 반면에 엔진 회전 속도의 하모닉들 같은 사인곡선 신호(sinusoidal signal)들은 지연 행위 하에서 상관되어 지게 남는다. 첫번째 단계에서 오차 신호 $\epsilon_{k,1}$ 은 충격파와 광대역 노이즈(broadband noise)로 구성되어지는 비상관 성분들(uncorrelated components)을 포함해야만 한다. 만약 지연(delay) Δ_1 이 너무 작거나, 또는 필터 길이 L_1 이 잘못 선택되면 충격파들은 또한 약해지게 된다. 이것을 어떻게 선택해야 하는 것에 대한 토의는 나중에 다룰 것이다. 두 번째 단계의 ALE에서는 첫번째 단계로부터의 오차신호가 입력신호로써 사용되어 진다. 두 번째 단계의 ALE의 기능은 광대역 노이즈를 포함하는 충격파들을 확대시키는 것이다. 이것은 충격파들의 협적 구조(local structure)와 노이즈의 짧은 연관성을 활용함으로써 이루어 진다. ALE 구조는 Δ_2 가 충분히 크면 ALE는 노이즈를 예측할 수 없다. 반면에 충격파들의 경우 만약 필터가 변화하는 행동(non-stationary behavior)을 추적할 수 있으면 이것들을 예측 할 수 있다. 결과적인 필터 출력 $\epsilon_{k,2}$ 은 확장된 SNR의 충격파들을 포함해야만 한다.

3.2 필터 변수들을 선택하는 조건들

충격파의 주기적 특성은 기구(scheme)의 첫 단계가 협대역 성분들로부터 그것들을 구분 시키겠지만 그렇게 하는 중에 그것들을 줄 일 것이라는 가능성은 열어 놓고 있다. 이러한 우발성을 피하기 위해 Δ_1 , L_1 과 같은 변수들의 선택에 주의를 기울여야 한다. LMS 알고리즘에 있어서 필터 비중 벡터(filter weight vector) w_k 에 대한 수정된 식은 다음과 같이 쓰여질 수 있다.

$$w_{k+1} = (I - 2\mu x_k x_k^T) w_k + 2\mu d_k x_k \quad (6)$$

여기서 w_k 는 가장 최근 입력 샘플들인 L_1 을 포함하는 열 벡터이다. 식(6)로부터 $w_0=0$ 이고 모든 k 에 대해 d_k 또는 x_k 가 0이면 비중 벡터는 0이 됨을 알 수 있다. 그래서 만일 $L_1 < T_p - 2\Delta_1$ 을 만족하면⁽¹²⁾ 능동적 필터의 충격반응(impulse response)은 0이 되며, 충격파는 능동적 필터에 의해 줄어들지 않는다. 반면에 $L_1 < T_p - 2\Delta_1$ 이면 w_k 는 0이 아니다. 능동적 필터 변수들의 설계에 대한 세부 내용들은 문헌 참조(7)에 언급되어져 있다.

4. 응용

공업용 기어들의 초기 이상 진단에 관한 중요한 연구들은 수행되어져 왔다.⁽⁹⁾ Fig.2(a)는 이상 기어로부터 측정된 진동신호를 보여주고 있다. Fig.2(a)로부터 우리는 이상기어의 진동에 대한 특징들을 구분할 수 없다. 왜냐하면 그들은 축 회전속도의 기본 및 하모닉 성분들에 의해 감추어져 있기 때문이다. 축 회전속도와 일치하는 신호가 없이 기본 치 맞물림 주파수와 그 하모닉들을 제거하기 위해 우리는 이 단계 ALE를 이용한다. 이 단계 ALE를 사용하는 과정 후에 충격파는 Fig.2(b)에 보이는 것처럼 기어 이상신호에 대해 보다 더 좋은 정보를 준다. 이러한 기어의 이상에 대한 정보를 더울 명백히 하기 위해서 Kurtosis를 구하면, Fig.2(c)처럼 기어

이상 시 발생하는 충격신호만을 명백히 탐지 할 수 있다.

5. 결 론

기어에 있어 충격음과 진동 신호들은 그들의 이상 진단들을 위한 유용한 도구이다. 왜냐하면 이런 것들은 충격에 의해 야기되기 때문이다. 하지만 이러한 충격파들의 탐지는 회전속도의 기본주파수와 하모닉들, 광대역 노이즈 같은 고차원적 배경 노이즈에 의해 방해를 받는다. 야기되어진 신호가 유용하지 못한 상황 하에서 우리는 두단 계 ALE로 불리어지는 기구(scheme)를 제안 했다. 이것은 각각의 다른 역할을 하는 두개의 ALE들로 구성된다. 이 방법은 어떤 기준 신호(reference signal)를 요구하지 않고 기준 신호로써 원래 신호의 지연된(위상이 이동된) 버전(delayed version)을 사용한다. 이 알고리즘으로부터 결과는 기어 이상에 대한 정보를 제공하는 충격 신호를 조기에 탐지 할 수 있다.

참고문헌

- (1). Lee, S. K. and PR. White 1999, Two-Stage Adaptive Line Enhancer and Sliced Wigner Trispectrum for the Characterisation of Faults from Gear Box Vibration Data, ASME Transaction, Journal of Vibration and Acoustics, Vol21, p488~512
- (2). Zhuge, Q. "Non-stationary modelling of vibration signals for monitoring the condition of machinery", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 4, No.(5), p355-365,1990.
- (3). Dyer, D. and Stewart, R. M. "Detection of rolling element bearing damage by statistical vibration analysis" Trans. of ASME. Journal of Mechanical Design Vol.100, No.2, 229-235,1978.
- (4). Randall, R. "Cepstrum analysis and gearbox fault detection", B&K Application Note, Technical Report, p13-150,1982
- (5). Wang, W. J. and McFadden, P. D. "Early detection of gear failure by vibration analysis - I. Calculation of the time-frequency distribution", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 7, No.3, p193-203, 1993.
- (6). Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R. "Local tooth fault detection in gearboxes using a moving window procedure", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.11, p 331-350, 1997.
- (7). Lee, S. K. and White P. R. "Fault identification for rotating machinery using adaptive signal processing and time-frequency analysis", ASME Design Engineering Technical Conferences, 16th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, DETC97/VIB-4236, 1997.
- (8). Zoubi, A. M. and Böhme, J. F. "Application of higher-order Spectra to the analysis and detection of knock in combustion engines", Higher-Order Statistical Signal Processing, Edited by Boashash, B and et al, Longman, p270-290. 1995.
- (9). Lee, S. K. and White, P. R. "identification of fault signals in rotating machinery using Higher Order Time Frequency Analysis" ASME Design Engineering Technical Conferences, 16th Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise, DETC97/VIB-4137, 1997.
- (10). Staszewski, W. J. and Tomlinson, G. R. "Time Frequency analysis in gear box fault detection using the Wigner-Ville distribution and pattern recognition", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.11, No.5, p673-692, 1997.
- (11). Braun, S. G. and Seth, B. B., 1979, "On the extraction and filtering of signals acquired from rotating machines" Journal of Sound and Vibration 65(1), 37-50.
- (12). Lee, S. K. and P. R. White, 1998, " Enhancement of impulsive signals for fault detection", Journal of Sound and Vibration, accepted paper.

(13). McFadden, P. D. "Examination of a Technique for the Early Detection of Failure in Gears by Signal Processing of the Time Domain Average of the

Meshing Vibration". *Mechanical System and Signal Processing*. vol.1, No.2, 177-183. 1987

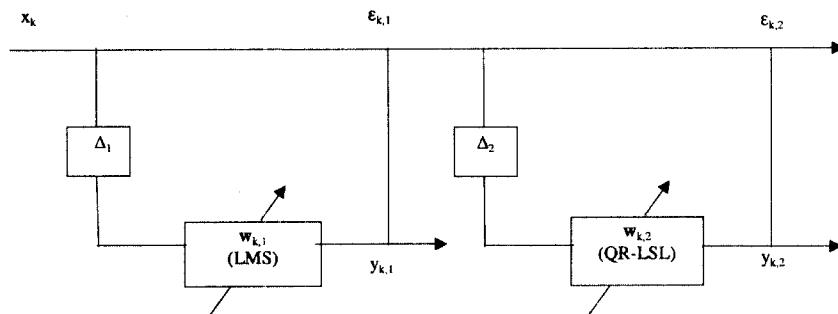


Fig. 1. Two-Stage Line Enhancer

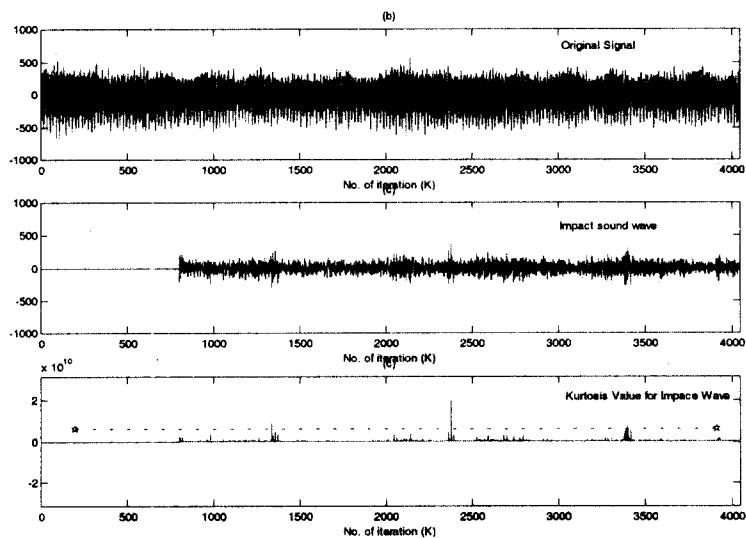


Fig.2 Vibration Signal for the Industrial Gear